

手動制御系における人間オペレーターの最適制御論的モデルに関する研究

著者	丸山 次人
号	752
発行年	1979
URL	http://hdl.handle.net/10097/9488

氏 名	丸 山 次 人
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 5 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	手動制御系における人間オペレータの最適制御論的 モデルに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 竹田 宏
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 竹田 宏 東北大学教授 松尾 正之 東北大学教授 畑中 浩 東北大学教授 木村 正行 東北大学助教授 阿部 健一

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

人間が閉ループ制御系の制御要素として比較，調整あるいは操作などの制御動作を行っている系を手動制御系という。たとえば，自動車・飛行機などが身近な例である。これらの手動制御系をより安全で信頼性の高いものにするためには，オペレータとしての人間の特性を考慮した機械を設計し開発することが必要である。そのためには，人間の制御能力の特徴や限界あるいは人間の特性の時間的変動などについて熟知していなければならない。このようなことから，人間の制御動作を解析してその数学的モデルを確立することは，制御工学・人間工学の分野において大変興味ある問題である。

手動制御系における人間の制御動作に関しては，従来より数多くの研究成果が報告されている。特に近年，人間の制御動作がある意味で合目的に行われていると考え最適制御理論を適用して，人間の内部の制御機構を明らかにしようとする試みがなされている。しかしながら，人間がどのような評価関数に基づいて制御を行っているのかということについての研究は，まだ十分になされていない。また，目標値の性質や制御対象の特性の違いに対して示す人間の適応能力については，伝達関数モデルのパラメータ値の変化として明らかにしたものはあるが，最適制御理論の立場から解析したものはみあたらない。

以上のことを背景にして、本論文では、目標値が予測の難しい不規則信号である場合の補償形手動制御系において、人間の制御動作がどのような制御機構で行われているかを解明するために、最適制御理論を用いて人間の状態モデルを導出する。そして、評価関数の重み係数をパラメータとして、理論モデルの一巡周波数特性や応答を実験結果と比較検討し、制御対象の特性に応じて変わっていく人間の優れた適応動作について考察する。

第2章 手動制御系の構成と実験

本章では、本研究で対象とする手動制御系の構成および実験方法について述べ、実験で得られた結果について明らかにしている。

本研究では、あらゆる種類の手動制御系の基本形式である単一入力、単一出力、単一ループの補償形手動制御系を用いた。目標値としては人間の予知トラッキング動作を避けるために不規則信号を考え、正規性白色雑音で励振された伝達関数 $G_P(s) = 1/(s+1)^3$ なるシェイピング・フィルタの出力を用いている。目標値と制御量との誤差がブラウン管上の長さ6cmの輝線の左右の振れによって表示される。操作器は復元力のない回転形ポテンシオメータに長さ5cmのハンドルを取り付けたものである。実験は正常な運動能力を有する大学生をオペレータとして、伝達関数 $G_P(s) = 1, 1/s+1, 1/s, 1/s(s+1)$ および $1/s^2$ の5種類の制御対象について行い、オペレータには「操作器を適当に操作して誤差をできるだけ小さくせよ。」という指示を与えている。1回の実験時間はオペレータの疲労や飽きなどを考慮して3分とし、毎回数分の休憩をはさんで試行を繰り返す。オペレータは試行を繰り返すことにより制御特性を改善していくが、本論文ではオペレータの学習過程については割愛し、十分な練習によって学習が完了した後のオペレータの制御動作について考察する。

以上のような実験から、次のことが明らかになった。オペレータの応答がサンプラーと零次ホールド回路を介して出力されたような階段状の波形になっていること、また種々の制御対象に対する制御量や操作量のパワースペクトルから、人間は制御対象の種類に応じて優れた適応性を示すこと、などが明らかになった。

第3章 手動制御系の最適制御論的モデル

前章で述べた補償形手動制御系におけるオペレータの制御動作は合目的的な方法で行われていると仮定して、最適制御理論の立場からオペレータの優れた適応能力を解明していく。

まず、オペレータの理論モデルを導出する上で基本となる4つの仮定を設定する。

A1) 人間の制御機構を感覚系と運動系とに分ける。運動系を既知の特定数 T_M をもつ一次遅れ系でモデル化し、感覚系をある評価関数を最小にする最適制御装置とみなしてこの構造について考察する。

A2) オペレータの制御動作を線形システムで記述する。それで表しきれないオペレータの非線形や非定常な動作をレムナントとして、感覚系から出力される制御信号への正規性白色雑音でモデル化する。

A3) 感覚系における情報処理は時間離散的に行われていると仮定し、オペレータをサンプル値制御モデルで表す。そして、感覚系を一つの離散形制御装置と考え、その前後に同期したサンプラーを設ける。

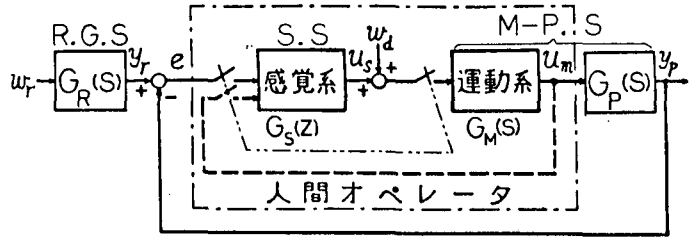
A4) 人間のむだ時間は観測機構に集中して存在するものとして取り扱う。

これらの仮定に基づくオペレータの離散形モデルは第1図のようになる。制御系の構成要素、目標値生成システム

(R. G. S) や運動系—
制御対象 (M—P. S) は
離散形状態方程式で記述
される。

次に、制御に十分習熟
したオペレータが持って
いる評価関数として、次

のような誤差分散と操作量の差分の分散の和からなる二次形式を仮定する。



第1図 人間オペレータの離散形モデル

$$J(u_s(k)) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \left[\sum_{k=1}^n e^2(k) + \frac{\lambda}{t_s^2} \{ u_m(k) - u_m(k-1) \}^2 \right] \quad (1)$$

ここで、第1項はオペレータの制御成績を、第2項は操作量の急激な変化をなるべく避けなめらかな制御を行おうとするオペレータの特性を考慮したものである。 λ は重み係数で、オペレータの制御動作を特徴付ける重要なパラメータである。ただし、 u_s は感覚系から出力される制御信号を、 u_m は運動系から出力される操作量を、 e は誤差を表している。 t_s はサンプル周期である。

第4章 パラメータ最適化手法によるモデル化

本章では、前章の基本的な仮定と評価関数の下に、パラメータ最適化手法を適用してオペレータの離散形状態モデルを導出する。

まず、(1)式の評価関数を最小にする感覚系 (S. S) のモデルとして、むだ時間を含み微分要素が実現できる形を仮定する。次に、R. G. S、M—P. SおよびS. Sの3つのシステムを合成して得られる閉ループ制御系 ($C_2 \cdot S$) を考える。

$$(k+1) = H(k) + D w(k) \quad (2)$$

$$e(k) = \hat{C}' T(k) \quad (3)$$

$$\text{ただし、} H = M + NFP \quad (4)$$

$$E[w(k)] = 0, \quad \text{cov}[w(k)] = W \geq 0 \quad (5)$$

ここで、 F は感覚系の構造を規定する行列であり、 $E[\cdot]$ および $\text{cov}[\cdot]$ はそれぞれ平均と分散を意味する。また、 $C_2 \cdot S$ の導入によって(1)式は

$$J(F) = \text{tr} \sum_{j=0}^{\infty} H^j (T' \hat{C} \hat{C}' T + \frac{\lambda}{t_s^2} S' S) H^j D W D' \quad (6)$$

$$\text{ただし, } S = S_m + S_n F P \quad (7)$$

と書き換えられる。行列HおよびSはFを含んでいるから、評価関数はFの関数となる。

結局、本研究の問題は、 $C_2 \cdot S$ が与えられた下で(6)式を最小にする感覚系の構造を求めるパラメータ最適化問題と考えることができる。この問題は摂動法を用いて解くことができ、最適なFは、

$$F = - \left[N' K N + \frac{\lambda}{t_s^2} S_n' S_n \right]^{-1} \left[N' K M + \frac{\lambda}{t_s^2} S_n' S_m \right] \cdot L P' \left[P L P' \right]^{-1} \quad (8)$$

で与えられる。ここで、K、Lは次の代数方程式の非負定解である。

$$K = H' K H + T' \hat{c} \hat{c}' T + \frac{\lambda}{t_s^2} S' S \quad (9)$$

$$L = H L H' + D W D' \quad (10)$$

さて、理論モデルの一巡周波数特性が簡単な一次遅れとなると考え、具体的に感覚系の構造Gs(S)を次式のように仮定する。

$$G_s(S) = \frac{\bar{K}(T_I s + 1)}{T_I s + 1} e^{-s\tau} \cdot (T_K s + 1) \quad (11)$$

ここで、前半の部分はMcRuerらが提案しているオペレータのモデルにおいて、運動系の一次遅れ系を取り除いたものであり、後半は $0.05 < \omega < 5 \text{ rad/sec}$ の範囲で近似的に制御対象の極を打ち消すために挿入した項である。ただし、制御対象が比例要素のときは $T_K = 0$ とする。

このように感覚系の構造と次数をあらかじめ仮定した上で、勾配法を用いて(6)式を最小にするFを求めることによって感覚系の状態モデルが完成する。導出した理論モデルと実験結果とを比較検討することによって、本手法の妥当性を吟味した。その結果、評価関数の重み係数 λ をパラメータとして、モデルの系の一巡周波数特性と実験値とが良く一致すること、また、ハイブリッド計算機シミュレーションによる応答と実験値とが良く類似していること、などが確かめられた。

第5章 最適レギュレータの手法によるモデル化

本章では、前章とは異なり最適レギュレータの手法を用いてオペレータの離散形状態モデルを導出する。

まず、第3章の基本的な仮定に加え新たに次のような仮定を設ける。

A5) 操作量を観測する局部フィードバック・ループが感覚系中に存在するものと仮定する。これによって、第1図の破線で示されるループが新しく加わる。次に、R・G・SとM・P・Sの合成系として、誤差を出力とする誤差系(E・S)を考える。E・Sは、

$$x(k+1) = A x(k) + b u_s(k) + D w(k) \quad (12)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} e(k-\ell) \\ u_m(k-\ell) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{c}' \\ \hat{c}_m' \end{bmatrix} x(k-\ell) = C x(k-\ell) \quad (13)$$

$$\text{ただし, } \ell = \frac{\tau}{t_s} \quad (14)$$

$$E\{w(k)\} = 0, \quad \text{cov}\{w(k)\} = W \geq 0 \quad (15)$$

で与えられる。このE.Sの導入によって、本章における問題は、E.Sが与えられた下で(1)式を最小にする感覚系からの最適制御信号 u_s を求める最適レギュレータ問題に帰着できる。この種の問題は、E.Sの(A, b)が可制御でかつ(A, C)が可観測ならばD.P法を用いて解くことができ、感覚系から出力される u_s は次のように求められる。

$$u_s(k) = f' \hat{x}(k|k-\ell) \quad (16)$$

$$f' = -[b'(K+Q_1)b]^{-1} b'[(K+Q_1)A-Q_3] \quad (17)$$

$$\hat{x}(k|k-\ell) = E\{x(k)|y(i), i \leq k\} \quad (18)$$

ここで、Kは次のRiccatiの代数方程式の解である。

$$K = A'(K+Q_1)A + Q_2 - [A'(K+Q_1) - Q_3]b \cdot [b'(K+Q_1)b]^{-1} b'[(K+Q_1)A - Q_3] \quad (19)$$

$$\text{ただし, } Q_1 = \bar{c} \bar{c}' + \frac{\lambda}{t_s^2} \bar{c}_m \bar{c}_m' \quad (20)$$

$$Q_2 = \frac{\lambda}{t_s^2} (\bar{c}_m \bar{c}_m' - A' \bar{c}_m \bar{c}_m' - \bar{c}_m \bar{c}_m' A) \quad (21)$$

$$Q_3 = \frac{\lambda}{t_s^2} \bar{c}_m \bar{c}_m' \quad (22)$$

u_s は(16)式で決定される量であるが、 x のすべての状態変数が直接観測されておらず、また観測機構にむだ時間が存在するので、 $\hat{x}(k|k-\ell)$ は状態推定器と予測器とによって生成される。状態推定器としては観測機構に観測雑音を考えていないので、Tseらの最小次元状態観測器を利用し、予測器は最小二乗予測器を用いる。以上の結果から、オペレータの感覚系の状態モデルはむだ時間要素、最小次元状態観測器、最小二乗予測器および最適ゲインから構成される。

導出した理論モデルと実験結果とを比較検討することによって、次のようなことが明らかになった。評価関数の重み係数 λ をパラメータとして、モデルの系の一巡周波数特性やハイブリッド計算機シミュレーションによる応答が、実験で得られたものと良く一致した。また、操作量のパワースペクトルについてモデルと実験によるものとを比較した結果、制御の難しい制御対象においては、オペレータはその特性を把握したり系を安定に保つために、最適制御理論の適用だけでは説明しきれなれ特徴的な操作を行っていることが明らかになった。さらに、重み係数 λ の値は制御対象の特性に応じて特徴的な変化を示すこともわかった。このことから、従来の伝達関数モデルでは十分に把握できなかった人間の優れたプロセス適応能力を、人間が持っていると思われる評価関数の変化としてとらえる、という一評価法が確立されたものと思われる。

第6章 結 言

この章では、本論文の総括を行い、第2章から第5章までの結論をまとめるとともに、今後の課題について述べている。

審 査 結 果 の 要 旨

手動制御系における人間オペレータの動特性を表わす数学的モデルは、人間—機械系の解析・設計、人間の適応・学習機能の解明等に際し必要不可欠であり、従来より制御工学、人間工学その他の分野で多くの研究がなされている。しかし人間の優れた適応性を説明できるようなモデルはまだ得られていない。

著者は、習熟したオペレータの制御動作が合目的に行われているという観点に立ち、適当な評価関数を導入し、それを最小にするオペレータの状態方程式モデルを求めるとともに人間のもつ適応性を明らかにした。本論文はそれらの成果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では、本研究で対象としたランダム入力をもつ補償形手動制御系の構成と実験方法、および種々の制御対象に対する一巡伝達関数モデルについて述べている。

第3章では、以下の章でオペレータの最適制御論的モデルを導くために、人間を感覚系と運動系に分け、感覚系においては時間離散的に情報処理が行われているという基本的仮定と評価関数について考察し、本研究で決定すべきシステムは感覚系であることを指摘している。

第4章では、第2章で得られた実験結果を基に感覚系状態方程式の次数と構造を予め仮定し、そこに含まれるパラメータを静的最適化手法を適用して求めている。またこのモデルは簡単な制御対象に対して実験結果と良く一致することを示している。

第5章では、最適レギュレータ手法を適用して感覚系の状態方程式を導き、感覚系がむだ時間、最小次元オブザーバ、最小2乗予測器および最適ゲイン要素によってモデル化できることを明らかにしている。さらに異なった制御対象に対して評価関数に含まれる重み係数変ることに着目して、人間の適応性を説明している。これらは新しい重要な知見である。

第6章は結言である。

以上要するに、本論文は最適制御理論の立場から手動制御系における人間オペレータの状態方程式モデルを導くとともに実験によりそのモデルの有効性と、人間の適応性を明らかにしたもので、制御工学、人間工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。